

УДК 621.323

О.О. Сьомка, В.В. Прус

## УРАХУВАННЯ ЗМІНИ ТЕПЛОВИХ ТА ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ІЗ ТРИВАЛИМ НАПРАЦЮВАННЯМ НА ВІДМОВУ

*Обґрунтовано особливості визначення теплових та вібраційних параметрів електричних машин при тривалому напруженні на відмову за умов наявності дефектів основних конструктивних вузлів та елементів. Обумовлено необхідність удосконалення існуючих та розробки нових методів дослідження та моделей надійності на їх основі.*

*Обоснованы особенности определения тепловых и вибрационных параметров электрических машин при продолжительной наработке на отказ при условии наличия дефектов основных конструктивных узлов и элементов. Обусловлена необходимость усовершенствования существующих и разработки новых методов исследования и моделей надежности на их основе.*

### ВСТУП

Парк електричних машин, що експлуатуються на сьогодні в умовах промислового виробництва та сільськогосподарства, є переважно застарілим, так як складається з електричних машин (ЕМ), введених до експлуатації понад 10-15 років тому. Для них важливою задачею є визначення поточного технічного стану та залишкового ресурсу роботи, оскільки втрати від простою приводного обладнання можуть бути достатньо суттєвими. На сьогодні задача забезпечення надійності ЕМ переважно вирішується за рахунок застосування системи планово-попереджувальних робіт (ППР), що передбачає проведення періодичних оглядів та випробування досліджуваних машин через певні проміжки часу. Останнє пов'язано із виведенням їх з експлуатації та не гарантує безвідмовної роботи у міжремонтний період внаслідок загального старіння конструкції.

Серед різних факторів, що погіршують властивості ЕМ, одними з основних є механічні та термомеханічні навантаження.

Відомо, що при додаванні до фактору теплового старіння фактора вібрації, середнє напруження на відмову електричних машин зменшується приблизно у 4 рази, при додатковому урахуванні частих динамічних зусиль і перенапруг при реверсах – у 2,5 рази, а при одночасному впливі перерахованих факторів – майже у 30 разів [1].

Таким чином, актуальним науковим завданням є спільне урахування теплових та вібраційних впливів при розрахунках працездатності ЕМ.

При цьому слід враховувати, що електрична машина є складним об'єктом, який об'єднує невідновлювані та відновлювані вузли, для кожного з яких розрахунки показників надійності певною мірою різняться.

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Існує ряд робіт, що доводять суттєву зміну теплових та вібраційних параметрів електричних машин при тривалому напруженні на відмову та у процесі ремонту [2, 3].

Також частково досліджено вплив пошкоджень окремих вузлів електричних машин на вібраційні параметри. Так, для пошкодженої сталі осердя якоря машин постійного струму доведено, що навіть несуттєве за глибиною і за площею закорочення зубцевої зони призводить до зниження значення магнітної індукції в

області пошкоджених зубців на 17-23 % [4]. Отримані результати вказують на суттєву (від 20 до 45 %) зміну величини нормальної складової електромагнітної сили у зоні дефектів шихтованих осердь, що обумовлює зростання електромагнітної складової вібрації.

Аналогічні дослідження для асинхронних двигунів показали, що зміни властивостей сталі зубцевої зони статора суттєво послаблюють основний магнітний потік АД та викликають перерозподіл електромагнітних зусиль у зоні ушкоджень [5]. Окреме урахування змін властивостей сталі ярма і зубців сердечника статора дає додаткове зниження вібробуджуючої сили на 15,61 %, а урахування нерівномірності розподілу властивостей сталі зубцевої зони – ще на 17,11 %. Для нормальної складової ці зміни є більш значними і становлять 20,61 % і 23,42 % відповідно. З урахуванням того, що складові зусиль на діаметрально протилежних щодо ротора ділянках магнітного кола: зубці статора – повітряний проміжок – зубці ротора, у правильно спроектованій машині без дефектів врівноважені, описані зміни призводять до виникнення розбалансу зусиль, що є причиною додаткової вібрації.

Відомі також результати досліджень впливу на вібрацію інших дефектів конструкції, зокрема, дефектів стрижнів короткозамкненого ротора [6].

### МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На даний час оцінка теплового навантаження обмоток електричних машин виконується відповідно до ГОСТ 183-74 та проводиться на дослідному зразку машини під час приймальних і періодичних випробувань, а також при типових випробуваннях у разі зміни конструкції, параметрів або технології. У програмі приймально-здавальних випробувань, яким підлягає кожна електрична машина, що випускається, випробування на нагрівання не передбачені, що пояснюється їх значною тривалістю.

Слід зазначити, що можливості судження про теплові навантаження електричних машин за результатами випробувань, передбачених різними стандартами, обмежені. Як правило, це температура обмоток або інших частин машини у тривалому режимі S1. Передбачаються випробування і у короткочасному режимі S2 (при тривалості 30 або 60 хв). Випробування проводяться при номінальному струмі для відповідного режиму; при цьому фіксується максимальна температура  $\theta_{\max}$ , яка не

© О.О. Сьомка, В.В. Прус

повинна перевищувати допустиму. Для електричних машин, призначених для роботи у повторно-короткочасних режимах, випробування проводяться у режимі S3 (зазвичай при тривалості циклу  $t_{\text{ц}} = 10$  хв. та тривалості включення 40 %). Випробування тривають до переходу у квазіусталений стан, коли зміна температури  $\theta(t)$  у циклі періодично повторюється в наступних циклах. Фіксуються максимальна  $\theta_{\text{max}}$  і мінімальна  $\theta_{\text{min}}$  температури у циклі. Стандартом, за спеціальної вимоги замовника, передбачені типові випробування у більш складних режимах роботи, однак це потребує наявності спеціальних випробувальних стендів.

У загальному ж випадку в електродвигунах має місце перехідний тепловий стан, що характеризується зміною температури їх окремих частин, мінливістю теплових потоків, незбалансованістю теплової енергії, що виділяється усередині машин та енергії, що відводиться за її межі. Виникаючи при цьому теплові перевантаження приводять до скорочення терміну служби ізоляції обмоток машини, а іноді і до аварійних ситуацій. Тепловий стан визначається не тільки потужністю джерел тепла (втратами в елементах конструкції), але і параметрами, що характеризують динаміку теплових процесів. Тому температури вузлів машин у нестационарних режимах не знаходяться у прямій залежності від потужності джерел тепла, як це має місце в усталеному стані для тривалого режиму S1.

Також існують окремі співвідношення і для оцінювання зношування ізоляції у період пусків  $\xi$ , за один пуск ЕМ в долях терміну служби [7]. На основі даних про кількість пусків та зміну температури можливо уточнити прогнозування терміну роботи ізоляції.

Зазначені вище методики застосовні для ЕМ із напрацюванням на відмову у межах припустимого ресурсу, тобто без явного проявлення існуючих дефектів їх конструктивних вузлів та елементів. Для машин із суттєвим напрацюванням на відмову необхідне їх уточнення та підвищення інформативності використовуваних показників.

Так, при розрахунку та аналізі динаміки теплового стану елементів конструкції ЕМ у різних режимах роботи раціонально використовувати систему диференціальних рівнянь, побудовану на основі еквівалентних теплових схем. При цьому слід враховувати всі можливі зовнішні і внутрішні чинники. Останнє означає, що час роботи теплові моделі слід розбивати на інтервали, які характеризуються однаковими умовами тепловідведення і потужністю джерел тепла.

За такого підходу було досліджено вплив зміни властивостей осердя статора на температуру його обмотки [3]. Як видно з рис. 1, за інших рівних умов, урахування реального розподілу втрат у сталі дає інші значення її максимуму, а введення в методику змін значень коефіцієнта теплопровідності (КТП), що обумовлено наявністю дефектів осердя, суттєво змінює форму цієї кривої і дає максимальне перевищення температури обмотки, більше за вихідне її значення на 7-10 %. Це певним чином переформулює та ускладнює задачу визначення максимуму температури.

Суть визначення вібраційних параметрів відповідно до стандартів зводиться до їх безпосереднього

вимірювання у різних точках електродвигуна. При цьому реєстрації підлягають як діючі (середньоквадратичні) значення, так і пікфактори. Межеві рівні припустимих вібрацій наведені у ГОСТ 20815-93, у відповідності з чим, критерієм, прийнятим для оцінки інтенсивності вібрації машин є середнє квадратичне значення віброшвидкості  $v_e$  (мм/с).

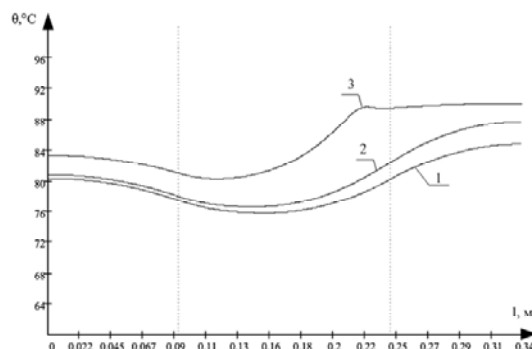


Рис. 1. Порівняльні залежності зміни перевищення температури обмотки статора  $\theta$  по її довжині  $l_1$  (1 – відповідає нормальному стану осердя статора, 2 – враховує тільки локальну зміну втрат в сталі, 3 – додатково враховує зміну КТП)

Більш перспективним у застосуванні є метод спектрального аналізу обвідної, в якому аналізується не сама високочастотна вібрація, а низькочастотні коливання її потужності [2].

Однак для детального визначення параметрів вібрації слід застосовувати методи спектрального аналізу, в яких як діагностичний параметр використовують значення амплітуди окремих гармонічних складових вібраційного сигналу. В основу цих методів покладено той факт, що різні види дефектів призводять до зростання складових вібрації у різних смугах частот [8]. При цьому для поділу на окремі складові широкосмугових сигналів слід використовувати частотний аналіз, що дозволяє оцінювати рівні вібрації у необхідних діапазонах частот.

На рис. 2, 3 наведено результати експериментальних досліджень інформативності спектрів радіальної складової вібрації АД типу АОЛ 12-4. Під час експериментів досліджувались віброспектри на частоті живлення (рис. 2) та частоті обертання АД (рис. 3) для випадків непошкодженого двигуна та двигуна з ослабленою посадкою ротора у корпусні кришки (сточене за колом зовнішнє кільце підшипника).

Як видно із отриманих результатів, про наявність статичного дисбалансу ротора свідчить збільшення першої та третьої гармоніки. У той же час наявність незмінної восьмої складової, більш за все, свідчить про порушення властивостей магнітної системи, а її додаткове насичення. Велика доля постійної складової може бути пояснена розвитком додаткових високочастотних коливань в АД малої потужності при поганому закріпленні фундаменту, що призводить до його власних коливань, розцінюваних засобами вібродіагностики як нормальний зважений шум.

Таким чином, незважаючи на велику кількість методів діагностики теплового стану та вібродіагностики електродвигунів, це питання продовжує залишатися актуальним, особливо для машин із суттєвим

напрацюванням на відмову. Серед основних причин цього є відсутність надійних критеріїв оцінки технічного стану, динаміки розвитку дефектів, методів прогнозування залишкового ресурсу, врахування наявності дефектів у конструктивних вузлах та елементах ЕМ. Наявні критерії враховують тільки межові значення параметрів, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку.

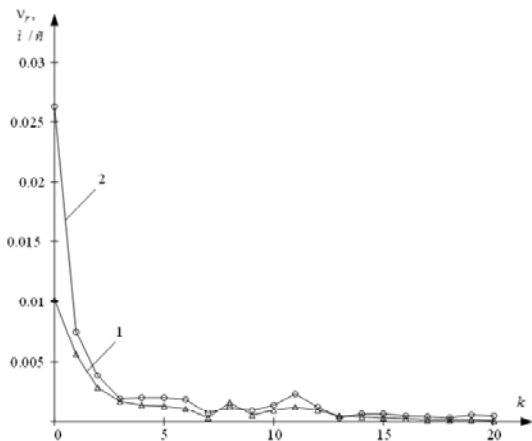


Рис. 2. Результати спектрального аналізу радіальної  $v_r$  складової вібрації відносно частоти живлення (1 – ЕМ без дефекту; 2 – ЕМ зі штучно внесеним дефектом)

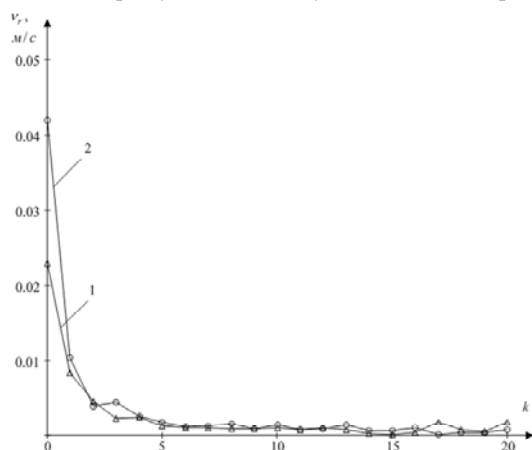


Рис. 3. Результати спектрального аналізу радіальної  $v_r$  складової вібрації відносно частоти обертання (1 – ЕМ без дефекту; 2 – ЕМ зі штучно внесеним дефектом)

До того ж існують особливості режимів роботи та вихідного стану ЕМ, що обумовлюють погіршення теплових та вібраційних параметрів. Так, до основних причин додаткового погіршення теплового стану обмоток ЕМ слід віднести наступне:

- перевантаження, викликані періодичним збільшенням моменту на валу робочої машини, що створюють кидки струму при зміні частоти обертання;
- робота на зниженій напрузі живлення, що призводить до значного збільшення часу розгону електродвигуна, при якому виділяється велика кількість тепла;
- робота при несиметрії живильної напруги, що зумовлює появу напруги зворотної послідовності та призводить до нерівномірного розподілу струмів в обмотках електродвигунів і зростання температур окремих фаз;
- значний період пуску двигуна при якому різко збільшується виділення тепла в обмотках, що може визвати перегрів та пошкодження ізоляції;

- висока частота включення-виключення ЕМ, що приводить, особливо у машинах великої потужності, до зменшення часу, відведеного на охолодження, та відповідно обумовлює перегрівання конструктивних вузлів та елементів;

- наявність виткових замикань, що супроводжуються суттєвими перегріваннями обмотки при збільшенні числа замкнених провідників.

Розглядаючи причини підвищення рівня вібрації ЕМ, слід враховувати саму природу вібрацій.

Зокрема, підвищення механічної складової вібрації виникає внаслідок дефектів підшипникового та колекторно-щіткового вузла, незбалансованості, неспівісності та перекошування ротора, при дефектах кріплення тощо. Електромагнітна складова вібрації, як зазначено вище, обумовлюється принципами утворення та просторовим розподілом вібробуджуючих зусиль. Основним проявом того, що дефект, який діагностується, має електромагнітну природу, є миттєве зникнення відповідної складової у спектрі вібрації після відключення електричної машини від мережі.

Проаналізувавши зазначене відповідно до [9], можна дійти висновку, що розвиток та прояв дефектів внаслідок збільшення складових вібрацій спостерігається у наступних випадках:

- ослаблення пресування осердь сталі, обрив або замикання в обмотці, що проявляються на подвійній частоті дії електромагнітних сил, рівній подвійній частоті живильної мережі;

- ексцентриситет внутрішньої розточки статора щодо вісі обертання ротора, що виникає зазвичай як дефект монтажу підшипникових стійок, дефект стану підшипникових щитів або при деформації статора та проявляється на частоті обертання поля у повітряному проміжку, іноді супроводжуючись появою бічних гармонік та нерівністю вертикальної і поперечної складовою відповідних гармонік;

- ексцентриситет зовнішньої поверхні ротора щодо вісі його обертання – проявляється на спектрі вібросигналу у посиленні першої гармоніки частоти обертання ротора. При цьому посилюється частота дії електромагнітної сили, навколо якої іноді з'являються бічні гармоніки, зсунуті одна відносно одної на частоту ковзання ротора, помножену на число полюсів;

- обрив або порушення контакту у стрижнях або кільцях "білячої клітки", що в асинхронному двигуні зазвичай проявляється поблизу частоти обертання вала ротора і завжди супроводжується появою бічних смуг, зсунутих щодо гармоніки частоти обертання ротора на інтервал, що дорівнює добутку частоти ковзання на число полюсів двигуна;

- ослаблення пресування всього пакету сталі ротора або тільки в області зубців, що супроводжується посиленням другої гармоніки живильної мережі або, при ослабленні сталі в області зубців, появою пазової частоти ротора з бічними смугами, зсунутими одна від одної на частоту, рівну подвійній частоті живлення.

Із наведених вище причин погіршення теплового стану ЕМ постає необхідність у розробці нових методів діагностики та моделей надійності, з відповідними експериментами для їх побудови, які будуть враховувати

вплив зміни стану конструктивних вузлів через розподіл джерел тепловиділення й умови теплопередачі.

Перерозподіл вібробуджуючих зусиль зумовлює необхідність розглядання впливу як єдиного цілого системи складного поєднання взаємопов'язаних джерел вібрації та механічних вузлів, через які вона передається, на розвиток дефектів конструктивних вузлів та елементів ЕМ. Тобто, необхідно дослідити, як на них буде впливати та проявлятися окремо механічна та електромагнітна складова вібрації.

При оцінці показників надійності ЕМ можна враховувати основні положення [10], згідно з якими інтенсивність відмов визначається перш за все різною дефективністю конструктивних вузлів та елементів і складається із наступних складових:

$$\lambda_{\text{def}}(t) = \text{def}_0 + \Delta \text{def}_t + \Delta \text{def}_e, \quad (1)$$

де  $\text{def}_0$  – дефективність у вихідному стані;  $\Delta \text{def}_t$  – прирощення дефективності, обумовлене впливом технологічних факторів при виготовленні конструктивних вузлів та елементів;  $\Delta \text{def}_e$  – прирощення дефективності, обумовлене впливом експлуатаційних факторів

$$\Delta \text{def}_e = H \times \tau, \quad (2)$$

де  $H$  – швидкість утворення дефектів, що залежить від величини основних експлуатаційних впливів: температури –  $\theta$ , частоти комутації –  $n_k$ , вібрації –  $v_e$ .

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано особливості визначення теплових та вібраційних параметрів електричних машин за умови наявності окремих видів конструктивних дефектів та пошкоджень.

2. Доведено необхідність та можливість урахування процесів старіння основних конструктивних вузлів та елементів електричних машин з високим рівнем напруження на відмову шляхом введення додаткових поправок на реальні теплові та вібраційні характеристики у розрахункові співвідношення для визначення показників надійності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мамед-Заде М.С. Исследование состояния асинхронных двигателей в режиме искусственной нагрузки // Известия вузов. Энергетика. – 1961. – С. 30-34.
2. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы: методические указания // Санкт-Петербург: Северо-Западный учебный центр, 2006. – 36 с.
3. Прус В.В., Загирняк М.В., Колотило И.А. Определение максимума температуры обмотки статора отремонтированных асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008(50). Частина 2. – С. 68-72.
4. Zagirnyak M., Prus V., Kushch I., Miljavec D. Modeling of electromagnetic field of electric machines with local variation of laminated core steel properties // Proceedings of the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics Engineering – ISEF 2013. – Ohrid, Macedonia, 2013.
5. Zagirnyak M., Prus V., Kolotylo I., Miljavec D. Research of induction motors magnetic system changed properties influence on vibration electromagnetic component // Materialy XXIII Sympozjum Srodowiskowe PTZE'2013 "Zastosowanie elektro-

magnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce". – Mikolajki, 2013. – P. 232-234.

6. Гераскин О.А. Вибродиагностика uszkodzeń rotorów potężnych asynchronnych dwiuguniv na osnovi polovoykh matematychnykh modeley: avtoref. diss. kand. tehn. nauk : 05.09.01. – K., 2012. – 18 s.
7. Сташко В. И. Система управления надежностью на базе регионального центра диагностики электрооборудования // Электронный физико-технический журнал. – 2011. – С. 44-51.
8. Баркова Н.А., Дорошев Ю.С. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учеб. пособие // Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 157 с.
9. Спектральная вибродиагностика [Электронный ресурс]: Русов В.А., 1996. – Режим доступа: vibrocenter.ru/book8.htm.
10. Конарев О.Г. Обеспечение эксплуатационной надежности асинхронных двигателей малой и средней мощности: Автореф. дис. канд. техн. наук: 15.09.01. – Томск, 2000. – 19 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mamed-Zade M.S. Issledovanie sostojaniya asinhronnyh dvigatelej v rezhime iskusstvennoj nagruzki. *Izvestija vuzov. Jenergetika*, 1961, pp. 30-34. 2. Barkov A.V., Barkova N.A., Borisov A.A. *Vibracionnaja diagnostika jelektricheskix mashin v ustanovivshisja rezhimakh raboty: metodicheskie ukazaniya*. St. Petersburg, Northwest educational center, 2006. 36 p. 3. Prus V.V., Zagirnyak M.V., Kolotylo I.A. Opredelenie maksimuma temperatury obmotki statora otremonirovannyh asinhronnyh dvigatelej. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2008, no.3(50), part 2, pp. 68-72. 4. Zagirnyak M., Prus V., Kushch I., Miljavec D. Modeling of electromagnetic field of electric machines with local variation of laminated core steel properties. *Proceedings of the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics Engineering – ISEF 2013*. Ohrid, Macedonia, 2013. 5. Zagirnyak M., Prus V., Kolotylo I., Miljavec D. Research of induction motors magnetic system changed properties influence on vibration electromagnetic component. *Materialy XXIII Sympozjum Srodowiskowe PTZE'2013 "Zastosowanie elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce"*. Mikolajki, 2013, pp. 232-234. 6. Heraskin O.A. *Vibrodiahnostyka ushkodzen rotoriv potuzhnykh asynkhronnykh dyvuhuniv na osnovi polovoykh matematychnykh modeley*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Kyiv, 2012. 18 p. 7. Stashko V.I. Sistema upravleniya nadezhnostyu na baze regionalnogo centra diagnostiki elektrooborudovaniya. *Elektronnyj fiziko-tekhnicheskij zhurnal*, 2011, pp. 44-51. 8. Barkova N.A., Doroshev Yu.S. *Nerazrushayushhij kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya gornyx mashin i oborudovaniya: ucheb. posobie*. Vladivostok, DVGUTU Publ., 2009. 157 p. 9. Rusov V.A. *Spektralnaya vibrodiahnostika*. Available at: vibrocenter.ru/book8.htm (accessed 13 September 2013). 10. Konarev O.G. *Obespechenie ekspluatatsionnoj nadezhnosti asinhrnnix dvigatelej maloj i srednij moshhnosti*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2000. – 19 p.

Поступила (received) 26.01.2014

Сомка Олександр Олександрович<sup>1</sup>, аспірант,  
Прус В'ячеслав В'ячеславович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup> Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 39600, Кременчук, вул. Першотравнева, 20, тел/phone +38 0536 743245, e-mail: oleksandrsmk@gmail.com

O.O. Somka<sup>1</sup>, V.V. Prus<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University 20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

## Allowance for heat and vibration parameters variation of electric machines with extended failure interval.

Peculiarities of heat and vibration parameters determination are substantiated for electric machines with extended failure interval under conditions of defects in the main structural units and elements. The necessity of their application to improving the existing research methods and reliability models and developing new ones is grounded.

**Key words** – electric machine, reliability, temperature, vibration parameters.